



DE 4326999



Device for magnetic-field-controlled switching

Veröffentlichungsnr. (Sek.) DE 4326999
Veröffentlichungsdatum : 1995-02-16
Erfinder : BERG HUGO DR VAN (DE)
Anmelder : SIEMENS AG (DE)
Veröffentlichungsnummer : DE 4326999
Aktenzeichen :
(EPIDOS-INPADOC-normiert) DE 1993 4326999 19930811
Prioritätsaktenzeichen :
(EPIDOS-INPADOC-normiert) DE 1993 4326999 19930811
Klassifikationssymbol (IPC) : H01F 10/00; H01L 43/08; G01B 7/00
Klassifikationssymbol (EC) : H01L 43/08
Korrespondierende Patentchriften

Bibliographische Daten

A device for magnetic-field-controlled switching according to the invention contains a switching magnet field source (20) and a giant MR layered stack having a switching layer (2) and a bias layer (6), and switch contacts (11A and 11B) for picking off a binary switching signal. The magnetisation (MB) of the bias layer (6) is set to be colinear with respect to the switching magnetic field (HS) and to be independent of it. The magnetisation (MS) of the switching layer (2) is directed parallel to the magnetisation (MB) of the bias layer (6) in one field region and in parallel to it, but in opposition, in a second field region.

Daten aus der esp@cenet Datenbank -- 12

BEST AVAILABLE COPY

THIS PAGE BLANK (USPTO)

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND

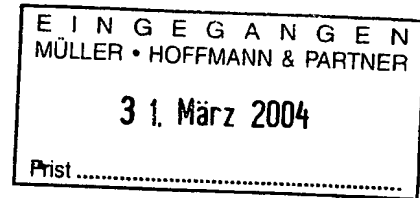


DEUTSCHES
PATENTAMT

①2 Offenlegungsschrift
①0 DE 43 26 999 A 1

⑤1 Int. Cl. 6:
H 01 F 10/00
H 01 L 43/08
G 01 B 7/00

②1 Aktenzeichen: P 43 26 999.0
②2 Anmeldetag: 11. 8. 93
④3 Offenlegungstag: 16. 2. 95



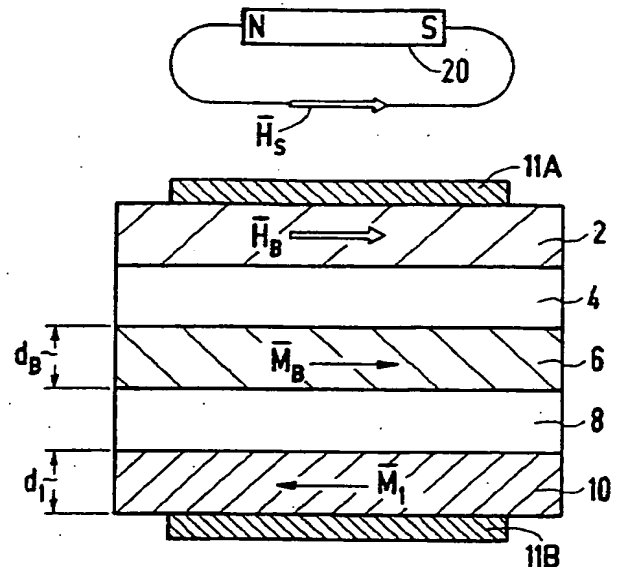
DE 43 26 999 A 1

⑦1 Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:
Berg, Hugo, Dr. van den, 91074 Herzogenaurach, DE

⑤4 Vorrichtung zum magnetfeldgesteuerten Schalten

⑤7 Eine Vorrichtung zum magnetfeldgesteuerten Schalten gemäß der Erfindung enthält eine Schaltmagnetfeldquelle (20) und ein Giant-MR-Schichtpaket mit einer Schaltschicht (2) und einer Biasschicht (6) und Schalterkontakten (11A und 11B) zum Abgreifen eines binären Schaltsignals. Die Magnetisierung (R_B) der Biasschicht (6) ist kollinear zum Schaltmagnetfeld (H_S) eingestellt und unabhängig von diesem. Die Magnetisierung (R_S) der Schaltschicht (2) ist in einem Feldbereich parallel und in einem zweiten Feldbereich antiparallel zur Magnetisierung (R_B) der Biasschicht (6) gerichtet.



DE 43 26 999 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 12. 94 408 067/186

24/30

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum magnetfeldgesteuerten Schalten.

In ferromagnetischen Übergangsmetallen wie Nickel (Ni), Eisen (Fe) oder Kobalt (Co) und in Legierungen mit diesen Metallen ist der elektrische Widerstand abhängig von der Größe und Richtung eines das Material durchdringenden Magnetfeldes. Diesen Effekt nennt man anisotropen Magnetowiderstand (AMR) oder anisotropen magnetoresistiven Effekt. Er beruht physikalisch auf den unterschiedlichen Streuquerschnitten von Elektronen mit unterschiedlichem Spin, die entsprechend als Majoritäts- und Minoritätselektronen des D-Bandes bezeichnet werden. Für magnetoresistive Sensoren wird im allgemeinen eine dünne Schicht aus einem solchen magnetoresistiven Material mit einer Magnetisierung in der Schichtebene verwendet. Die Widerstandsänderung bei Drehung der Magnetisierung bezüglich der Stromrichtung eines in der Schicht fließenden Meßstromes kann einige Prozent des normalen isotropen Widerstandes betragen und wird als Meßsignal erfaßt.

Es sind Mehrschichtsysteme bekannt mit mehreren, zu einem Stapel angeordneten ferromagnetischen Schichten, die durch nichtmagnetische Zwischenschichten voneinander getrennt sind und deren Magnetisierungen jeweils in der Schichtebene liegen. Die jeweiligen Schichtdicken sind dabei wesentlich kleiner als die mittlere freie Weglänge der Leitungselektronen gewählt. In solchen Schichtsystemen tritt nun bei Anlegen eines elektrischen Stromes zusätzlich zu dem anisotropen magnetoresistiven Effekt in den einzelnen Schichten der sogenannte Giant-magnetoresistive Effekt oder Giant-Magnetowiderstand (Giant-MR) auf, der auf der unterschiedlich starken, von der jeweiligen Magnetisierung abhängigen Streuung von Majoritäts- und Minoritäts-Leitungselektronen im Volumen der Schichten, insbesondere in Legierungen, sowie an den Grenzflächen zwischen den ferromagnetischen Schichten und den Zwischenschichten beruht. Dieser Giant-MR ist ein isotroper Effekt, d. h. er kann erheblich größer sein als der anisotrope MR mit Werten von bis zu 70% des normalen isotropen Widerstandes.

Es sind zwei Grundtypen von solchen Giant-MR-Mehrschichtsystemen bekannt. Bei dem ersten Typ sind die ferromagnetischen Schichten über die Zwischenschichten antiferromagnetisch aneinander gekoppelt, so daß sich die in den Schichtebenen liegenden Magnetisierungen von zwei benachbarten ferromagnetischen Schichten ohne äußeres Magnetfeld antiparallel zueinander ausrichten. Ein Beispiel für diesen Typ sind Eisen-Chrom-Übergitter (Fe-Cr-Superlattices) mit ferromagnetischen Schichten aus Fe und antiferromagnetischen Zwischenschichten aus Cr.

Für diesen Typ mit antiferromagnetisch gekoppelten, ferromagnetischen Schichten wurden theoretische Berechnungen durchgeführt, die eine Abhängigkeit der Strom- und der Transmissionskoeffizienten für an den Grenzflächen gestreute Elektronen mit Spin-up und solche mit Spin-down von dem Winkel zwischen den Magnetisierungen in benachbarten ferromagnetischen Schichten aufzeigen. Aus diesen Berechnungen ergibt sich, daß der Giant-MR bei von 0° auf 180° wachsendem Winkel zwischen den beiden Magnetisierungen stetig zunimmt und am größten bei einem Winkel von 180° ist ("Physical Review Letters", Vol. 63, Nr. 6, August 1989, Seiten 664 bis 667).

Bei dem zweiten Typ eines bekannten Giant-MR-

Mehrschichtsystems sind die nicht-magnetischen Zwischenschichten zwischen den ferromagnetischen Schichten so dick gewählt, daß die magnetische Austauschkopplung zwischen den ferromagnetischen Schichten möglichst gering ist. Die Zwischenschichten können aus einem Metall, einem Halbleiter oder auch einem Isolator bestehen. Jeweils benachbarte ferromagnetische Schichten weisen unterschiedliche Koerzitivfeldstärken auf. Die Abhängigkeit ihrer Magnetisierungen von einem Magnetfeld ergibt sich aus den entsprechenden Hysteresekurven des magnetisch weichen bzw. des magnetisch härteren Materials. Wenn die Magnetisierungen der magnetisch weichen Schichten parallel zu den Magnetisierungen der magnetisch härteren Schichten gerichtet sind, ist der Widerstand des Schichtsystems am kleinsten. Bei einer antiparallelen Ausrichtung der Magnetisierungen ist der Widerstand hingegen am größten.

Um nun ein auswertbares Sensorsignal zu erhalten, bringt man das Schichtsystem zunächst in Sättigung. Das bedeutet, daß bei einem Magnetfeld mit einer vorgegebenen Meßrichtung die Feldstärke des Magnetfeldes oberhalb der größeren der beiden Koerzitivfeldstärken der Schichten eingestellt wird und die Magnetisierungen aller Schichten somit parallel zu dieser Sättigungsfeldrichtung ausgerichtet werden. Es gibt einen solchen Sättigungsbereich für ein in Meßrichtung gerichtetes, positives Magnetfeld und einen weiteren, symmetrisch zum ersten liegenden Sättigungsbereich, in dem das Magnetfeld und damit auch alle Magnetisierungen umgekehrt gerichtet und damit negativ sind. Das Widerstandssignal ist nun abhängig davon, von welchem der beiden Sättigungsbereiche man startet. Beginnt man im negativen Sättigungsbereich, so bleibt das Widerstandssignal auf seinem minimalen Wert bis zu einer positiven Feldstärke etwas unterhalb der positiven Koerzitivfeldstärke der magnetisch weichen Schichten. Die Magnetisierungen der weichen Schichten werden nun gedreht und das Signal steigt bis etwas oberhalb dieser Feldstärke auf seinen maximalen Wert an. Nun sind die Magnetisierungen der magnetisch unterschiedlich harten Schichten antiparallel gerichtet und das Widerstandssignal bleibt in einem Bereich zwischen den beiden positiven Koerzitivfeldstärken etwa konstant. In einem Bereich um die positive Koerzitivfeldstärke der magnetisch härteren Schichten werden nun auch die Magnetisierungen der magnetisch härteren Schichten von dem Magnetfeld aus ihrer ursprünglichen Richtung gedreht und bei einer Feldstärke oberhalb dieser Koerzitivfeldstärke wieder parallel zum Magnetfeld und zu den Magnetisierungen der anderen Schichten gerichtet. In diesem positiven Sättigungsbereich ist das Widerstandssignal wieder minimal. Startet man hingegen im positiven Sättigungsbereich, so ergibt sich ein zu dem gerade beschriebenen Widerstandssignal spiegelsymmetrisches Widerstandssignal, das seinen minimalen Wert bei einer negativen Feldstärke etwas oberhalb der negativen Koerzitivfeldstärke des magnetisch weichen Materials und seinen maximalen Wert in einem Bereich zwischen den beiden negativen Koerzitivfeldstärken der beiden unterschiedlichen Materialien annimmt (EP-A-0 483 373).

Das MR-Signal dieser bekannten Schichtsysteme hängt somit von ihrer Vorgeschichte ab, d. h. auf welchem Weg und zwischen welchen Werten für das Magnetfeld sowie in welcher Richtung die Hysteresekurven durchlaufen werden. Ein solches Schichtsystem hat daher keine eindeutige Kennlinie.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zum magnetfeldgesteuerten Schalten anzugeben.

Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung gelöst mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Zeichnung Bezug genommen, in deren

Fig. 1 bis 4 Schaltkennlinien für eine Vorrichtung gemäß der Erfindung und

Fig. 5 bis 12 Ausführungsformen einer Vorrichtung gemäß der Erfindung jeweils im Querschnitt schematisch dargestellt sind. Entsprechende Teile der Vorrichtung sind mit denselben Bezugszeichen versehen.

Die Fig. 1 bis 4 zeigen verschiedene Schaltkennlinien, die mit Vorrichtungen zum magnetfeldgesteuerten Schalten realisiert werden sollen. Es ist jeweils die relative Widerstandsänderung dR/R als Schaltsignal S über dem Schaltmagnetfeld H_S aufgetragen. Positive Vorzeichen für die Feldstärken entsprechen dabei Feldern parallel zu einer vorgegebenen Schaltmagnetfeldrichtung und negative Vorzeichen zu dieser Richtung antiparallelen Feldern.

In Fig. 1 sind zwei Schaltsignale S_1 und S_2 mit jeweils zwei logischen Zuständen LL und LH in Abhängigkeit von dem Schaltmagnetfeld H_S aufgetragen. Bei dem ersten Schaltsignal S_1 liegt der erste, niedrige logische Zustand LL (Logical Low) in einem Bereich oberhalb eines ersten Grenzwertes H_1 und der zweite, hohe logische Zustand LH (Logical High) oberhalb eines zweiten Grenzwertes H_2 . Bei dem zweiten Schaltsignal S_2 liegt umgekehrt der hohe logische Zustand LH unterhalb von H_1 und der niedrige logische Zustand LL oberhalb von H_2 . In einem Übergangsbereich zwischen diesen beiden Grenzwerten H_1 und H_2 liegt jeweils eine Schaltflanke T1 und T2 des Schaltsignals S_1 bzw. S_2 , die die beiden entsprechenden Schaltzustände verbindet. Die Größe dieses Übergangsbereiches zwischen H_1 und H_2 ist für ein gutes Schaltverhalten möglichst klein zu halten. Die Grenzwerte H_1 und H_2 sind in den dargestellten Schaltkennlinien beide positiv, können allerdings auch beide negativ sein und sollen in einem vorgegebenen Schaltoperationsbereich SOR (Switching operating range) beliebig verschiebbar sein.

Fig. 2 zeigt eine Schaltkennlinie eines Schaltsignals S_3 mit zwei Schaltflanken T1 und T2 zwischen zwei logischen Zuständen LL und LH. Die eine Schaltflanke T1 liegt dabei in der dargestellten Kennlinie in einem Übergangsbereich zwischen zwei positiven Grenzwerten H_1 und H_2 mit $H_1 < H_2$, und die zweite Schaltflanke T2 liegt in einem Übergangsbereich zwischen zwei negativen Grenzwerten H_3 und H_4 mit $H_3 < H_4$. Es können allerdings auch alle vier Grenzwerte H_1 bis H_4 positiv oder alle negativ sein. Der erste, niedrige logische Zustand LL liegt zwischen H_4 und H_1 und der andere, hohe logische Zustand LH liegt unterhalb von H_3 und oberhalb von H_2 . Die dargestellten Übergangsbereiche zwischen H_3 und H_4 sowie zwischen H_1 und H_2 sind gleich groß und liegen symmetrisch zum Ursprung $H_S = 0$, können allerdings auch unsymmetrisch und/oder unterschiedlich groß sein.

Ein weiteres — nicht dargestelltes — Schaltsignal ergibt sich als invertiertes Schaltsignal zu diesem dargestellten Schaltsignal S_3 . Ein solches Schaltsignal ist dann in seinem hohen Zustand LH zwischen den Grenzwerten H_4 und H_1 und in seinem niedrigen Zustand LL unterhalb von H_3 und oberhalb von H_2 .

Das Schaltsignal S_4 in Fig. 3 weist drei logische Zustände LL, LM und LH auf mit einer ersten Schaltflanke T1 zwischen dem mittleren Zustand LM und dem hohen Zustand LH in einem Übergangsbereich zwischen zwei positiven Grenzwerten H_1 und H_2 und einer zweiten Schaltflanke T2 zwischen dem tiefsten Zustand LL und dem mittleren Zustand LM in einem Übergangsbereich zwischen zwei negativen Grenzwerten H_3 und H_4 . Der mittlere logische Zustand LM liegt somit zwischen H_4 und H_1 , der hohe logische Zustand LH liegt oberhalb von H_2 , und der tiefe logische Zustand LL liegt unterhalb des Grenzwertes H_3 . Ein weiteres — nicht dargestelltes — Schaltsignal ergibt sich als zu diesem Schaltsignal S_4 komplementäres Schaltsignal mit dem hohen Zustand LH unterhalb von H_3 und dem tiefen Zustand LL oberhalb von H_2 .

In der Schaltkennlinie gemäß Fig. 4 sind ein hoher logischer Zustand LH oberhalb eines positiven Grenzwertes H_2 und ein tiefer logischer Zustand LL unterhalb eines negativen Grenzwertes H_1 mit einer dazwischenliegenden Schaltflanke T für ein Schaltsignal S_5 vorgesehen. Auch hier ist ein komplementäres Schaltsignal möglich mit einem hohen Zustand LH für negative Schaltmagnetfelder $H_S < H_1$ und einem tiefen Zustand LL für positive Schaltmagnetfelder $H_S > H_2$.

In Fig. 5 bis 12 sind Ausführungsformen einer Vorrichtung zum magnetfeldgesteuerten Schalten dargestellt, mit denen Schaltkennlinien gemäß den Fig. 1 bis 4 realisiert werden können.

Alle Ausführungsformen enthalten eine Schaltmagnetfeldquelle 20, die zur Vereinfachung nur in Fig. 5 dargestellt ist und beispielsweise als vorzugsweise drehbarer Magnet oder als Spule ausgebildet sein kann, zum Erzeugen eines Schaltmagnetfeldes \vec{H}_S , dessen Feldstärke $\pm H_S$ in einem vorgegebenen Schaltoperationsbereich SOR liegt. Die Schaltmagnetfeldquelle 20 kann auch ein zeitlich variables und vorzugsweise rotierendes Magnetfeld erzeugen. Das Schaltmagnetfeld \vec{H}_S ist dann als Komponente dieses variablen Feldes parallel oder antiparallel zu einer Magnetisierung \vec{M}_B definiert.

Ferner sind bei allen Ausführungsformen wenigstens ein Giant-MR-Schichtpaket mit wenigstens einer Schaltschicht 2 und wenigstens einer Biasschicht 6 sowie an dem Schichtpaket angebrachte Schalterkontakte 11A und 11B, die nur in Fig. 5 und Fig. 6 dargestellt sind, vorgesehen. Die Biasschicht 6 weist eine Magnetisierung \vec{M}_B auf, die zum Schaltmagnetfeld \vec{H}_S kollinear, d. h. parallel oder antiparallel, gerichtet ist und in dem Schaltoperationsbereich SOR von dessen Feldstärke H_S zumindest weitgehend unabhängig ist. Die Schaltschicht 2 ist dagegen mit einer vom Schaltmagnetfeld \vec{H}_S beeinflussbaren Magnetisierung \vec{M}_S versehen. Diese nur in der Fig. 9 dargestellte Magnetisierung \vec{M}_S ist in einem ersten Feldbereich unterhalb eines ersten Grenzwertes H_a entweder parallel oder antiparallel zur Magnetisierung \vec{M}_B der Biasschicht 6 gerichtet und in einem zweiten Feldbereich oberhalb eines zweiten Grenzwertes H_b mit $H_b > H_a$ dann antiparallel bzw. parallel zu \vec{M}_B gerichtet. Als Feldbereich wird dabei der Bereich aller entsprechenden Feldstärkewerte verstanden.

Diese Eigenschaften der magnetischen Schichten des Schichtpakets können auf mehrere Arten erreicht werden. In einer Ausführungsform sind eine magnetisch härtere Biasschicht 6 und eine magnetisch weichere Schaltschicht 2 vorgesehen. Der maximale Schaltoperationsbereich ist dann durch die negative und positive Koerzitivfeldstärke der Biasschicht 6 begrenzt, und die Grenzwerte $H_a < 0$ und $H_b > 0$ liegen außerhalb des

Intervalls zwischen der negativen und der positiven Koerzitivfeldstärke der Schaltschicht 2. In dem Übergangsbereich zwischen H_A und H_B verhält sich die Magnetisierung \bar{M}_S der Schaltschicht 2 in dieser Ausführungsform gemäß ihrer Hysteresekurve. Vorzugsweise ist die Biasschicht 6 mit einer magnetischen Vorzugsachse versehen und entlang dieser Vorzugsachse magnetisiert. In einer weiteren Ausführungsform ist auch in die Schaltschicht 2 eine vorzugsweise zur Magnetisierung \bar{M}_B der Biasschicht 6 senkrechte Vorzugsachse eingeprägt. In dieser Ausführungsform ist die Magnetisierung \bar{M}_S der Schaltschicht 2 im Übergangsbereich reversibel vom Schaltmagnetfeld \bar{H}_S abhängig. Diese drei Ausführungsformen können auch kombiniert werden.

Der Giant-MR des Schichtpakets hat im allgemeinen bei einer parallelen Ausrichtung von \bar{M}_S und \bar{M}_B seinen minimalen und bei einer antiparallelen Ausrichtung der Magnetisierungen \bar{M}_S und \bar{M}_B seinen maximalen Wert. An den Schalterkontakten 11A und 11B wird somit ein MR-Schaltsignal mit zwei logischen Zuständen LL und LH, die dem minimalen bzw. maximalen Wert des Giant-MR entsprechen, und einer Schaltflanke T zwischen diesen beiden Zuständen LL und LH abgegriffen. Man erhält somit ein Schaltsignal S1 gemäß Fig. 1 mit einer ansteigenden Schaltflanke T, wenn die Magnetisierung \bar{M}_B der Biasschicht 6 Parallel zum Positiven Schaltmagnetfeld \bar{H}_S gerichtet ist, und ein Schaltsignal S2 mit einer abfallenden Schaltflanke T, wenn Magnetisierung \bar{M}_B und Schaltmagnetfeld \bar{H}_S antiparallel gerichtet sind. Im allgemeinen sind die Schaltflanken dann von einem negativen Grenzwert H_1 und einem positiven Grenzwert H_2 begrenzt.

Um nun, ausgehend von diesen grundlegenden Ausführungsformen, die Grenzwerte H_1 und H_2 innerhalb des Schaltoperationsbereiches verschieben zu können, kann die Vorrichtung auf folgende Arten weitergebildet werden:

- (i) Es ist ein äußeres Stützfeld \bar{H}_B für die wenigstens eine Schaltschicht vorgesehen, das kollinear zur Schaltmagnetfeld \bar{H}_S gerichtet ist.
- (ii) Es ist ein in dem Schichtpaket erzeugtes internes Stützfeld \bar{H}_B für die wenigstens eine Schaltschicht vorgesehen, das kollinear zum Schaltmagnetfeld \bar{H}_S ist.
- (iii) Die Schaltschicht und die Biasschicht sind magnetisch austauschgekoppelt.

Diese prinzipiellen Ausführungsformen können auch miteinander kombiniert werden.

Eine nicht dargestellte Ausführungsform ad (i) enthält entweder eine zusätzliche Magnetfeldquelle oder eine entsprechend zusätzliche Steuerung für die Schaltmagnetfeldquelle 20. Der Vorteil dieser Ausführungsform besteht darin, daß die Grenzwerte H_1 und H_2 und damit die Schaltflanke T auch noch nach der Herstellung des Schichtpakets und insbesondere im Betrieb der Vorrichtung verschoben werden können.

In einer einfachen, nicht dargestellten Ausführungsform ad (ii) wird ein internes Stützfeld \bar{H}_B für die Schaltschicht von der Biasschicht durch magnetostatische Kopplung erzeugt. Vorzugsweise wird die Magnetisierung \bar{M}_B der Biasschicht dabei durch Einprägen einer Vorzugsachse in die Biasschicht stabilisiert.

Eine andere Möglichkeit zum Erzeugen des internen Stützfeldes \bar{H}_B und zugleich zur Stabilisierung der Magnetisierung \bar{M}_B der Biasschicht ist in Fig. 5 dargestellt. In dieser Ausführungsform ist an die mit 6 bezeichnete

Biasschicht vorzugsweise über eine Kopplungsschicht 8 eine weitere Magnetschicht 10 antiferromagnetisch angekoppelt. Die Magnetisierung \bar{M}_1 der Magnetschicht 10 und die Magnetisierung \bar{M}_B der Biasschicht 6 sind deshalb antiparallel zueinander ausgerichtet. Zum Einstellen des internen Stützfeldes \bar{H}_B für die Schaltschicht 2 ist die vektorielle Summe aus den Produkten $d_B \bar{M}_B$ und $d_1 \bar{M}_1$ aus den Dicken d_B und d_1 mit den Magnetisierungen \bar{M}_B bzw. \bar{M}_1 der Biasschicht 6 bzw. der Magnetschicht 10 so gewählt, daß ein entsprechend gerichteter Netto-Magnetfluß außerhalb des aus der Biasschicht 6 und der Magnetschicht 10 gebildeten Schichtsystems entsteht. Die Schaltschicht 2 ist vorzugsweise über eine Zwischenschicht 4 von der Biasschicht 6 magnetisch weitgehend austauschgekoppelt. Es sind Schalterkontakte 11A und 11B auf der obersten und der untersten Schicht angeordnet, so daß der Strom senkrecht zu den Schichtebenen fließt (cpp = current-perpendicular-to-planes). Der Abstand der Schalterkontakte 11A und 11B entspricht bei einer cpp-Anordnung der Gesamtdicke des Schichtpakets.

In einer symmetrischen Ausführungsform gemäß Fig. 6 ist an die Magnetschicht 10 über eine weitere Kopplungsschicht 8' eine weitere Biasschicht 6' antiferromagnetisch angekoppelt. Die beiden Magnetisierungen \bar{M}_B und $\bar{M}_{B'}$ der beiden außenliegenden Biasschichten 6 und 6' sind somit parallel zueinander gerichtet. Das interne Biasfeld \bar{H}_B für die Schaltschicht 2 wird über die vektorielle Summe $d_B \bar{M}_B + d_1 \bar{M}_1 + d_{B'} \bar{M}_{B'}$ der drei Produkte aus Dicken und Magnetisierungsvektoren der drei Schichten eingestellt.

Die Schalterkontakte 11A und 11B sind in einem Abstand voneinander, der, obwohl in der Fig. 6 anders dargestellt, vorzugsweise wesentlich größer ist als die Gesamtdicke des Schichtpakets, auf der obersten Schicht angeordnet. In dieser Anordnung fließt der Strom im Mittel parallel zu den Schichtebenen (cip = current-in-planes).

Typische Abstände der Schalterkontakte liegen bei allen Ausführungsformen zwischen 3 nm und 1 mm bei typischen Schichtpaketdicken zwischen 3 nm und 400 nm.

In Fig. 7 ist ein Schichtpaket mit mehreren Schaltschichten 2 und Biasschichten 6 und 6' vorgesehen, in dem Schichtsubsysteme mit einer Biasschicht 6, einer Kopplungsschicht 8 und einer Magnetschicht 10 in einer Ausführungsform gemäß Fig. 3 und ein Schichtsubsystem mit zwei Biasschichten 6 und 6' und einer dazwischenliegenden und durch jeweils eine Kopplungsschicht 8 bzw. 8' an die Biasschichten 6 bzw. 6' antiferromagnetisch angekoppelten Magnetschicht 10 in einer Ausführungsform gemäß Fig. 6 enthalten sind. Die Netto-Magnetflüsse der einzelnen Schichtsubsysteme zeigen dabei vorzugsweise alle in die gleiche Richtung. Die Dicken der Biasschichten 6 und 6' und/oder der Magnetschichten 10 können dabei unterschiedlich eingestellt sein, um ein uniformes Biasfeld \bar{H}_B für alle Schaltschichten 2 zu erhalten. In einer bevorzugten Ausführungsform nimmt die vektorielle Summe der Produkte aus den Dicken und den Magnetisierungen der Biasschichten 6 und 6' und der mit diesen gekoppelten Magnetschichten 10 zum oberen und zum unteren Rand des Schichtpakets zu. Vorzugsweise nimmt dabei die Dicke derjenigen Schicht, deren Produkt von Dicke und Magnetisierung in der Mitte des Schichtpakets überwiegt, zum oberen und unteren Rand des Schichtpakets hin zu. In dem dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Dicken d_1' und d_1'' der unteren und oberen Magnet-

schichten 10' bzw. 10'' größer als die Dicke d_1 der mittleren Magnetschicht 10. Es ist auch ein Substrat 13 dargestellt, auf dem die Schichten vorzugsweise aufgedampft oder aufgesputtert sind.

In einer vorteilhaften, nicht dargestellten Ausführungsform sind die Schalterkontakte 11A und 11B in Richtung des Schaltmagnetfeldes H_s um vorzugsweise denselben Abstand vom Rand des Schichtpakets jeweils nach innen verlegt. Das ist bei cip- und cpp-Anordnungen möglich. Durch diese Maßnahme wird der Einfluß von entmagnetisierenden Feldern am Rand des Schichtpakets abgeschwächt.

Um Störeffekte durch Streufelder an den Rändern des Schichtpakets zu vermindern, sind in einer weiteren Ausführungsform gemäß Fig. 8. zwei Randbereiche 26 und 27 vorgesehen, in denen keine Schaltschicht 2 vorhanden ist, und ein mittlerer Bereich 23 mit Schaltschichten 2. Diese Verkürzung der Schaltschichten 2 wird wenigstens in Richtung parallel zur Magnetisierung M_B der Biasschicht 6 und vorzugsweise in allen Richtungen vorgenommen, so daß die Biasschichten 6 ringsum über die Schaltschichten 2 hinausragen. Die Zwischenschichten 4 sind vorzugsweise so lang wie die Biasschichten 6. Zwischen den Randbereichen 26 und 27 und dem mittleren Bereich 23 ist jeweils ein Übergangsbereich 24 bzw. 25 vorgesehen, in dem die Dicke der Schaltschichten 2 von außen nach innen kontinuierlich zunimmt. Während die Biasschichten 6 und die Zwischenschichten 4 in den Übergangsbereichen 24 und 25 wenigstens annähernd genauso dick sind wie in den Randbereichen 26 und 27 sowie im mittleren Bereich 23, nehmen die Dicken d der Schaltschichten 2 in den Übergangsbereichen 24 und 25 unter einem bestimmten Öffnungswinkel von $d = 0$ in den Randbereichen 26 und 27 bis zu einem konstanten Wert $d = d_s$ im mittleren Bereich 23 linear zu.

In einer nicht dargestellten Ausführungsform können zwischen den Randbereichen und dem mittleren Bereich jeweils eine Stufe sein, deren Höhen der Gesamtdicke der in den Randbereichen fehlenden Schaltschichten entspricht.

Um den Einfluß von entmagnetisierenden Feldern auf die Steilheit der Schaltflanken zu verringern, können auch umgekehrt die Biasschichten 6 wenigstens senkrecht zu ihrer Magnetisierung M_B und vorzugsweise ringsum kürzer ausgebildet sein als die Schaltschichten 2. Der Übergang kann wieder kontinuierlich sein analog zu den Ausführungsformen mit verkürzten Schaltschichten 2.

Eine Möglichkeit der Herstellung eines Schichtsubsystems aus einer oder zwei Biasschichten und einer Magnetschicht besteht darin, für die Biasschichten und die Magnetschicht Materialien mit unterschiedlichen Koerzitivfeldstärken zu wählen. Die Schichten werden in einem uniformen Biasmagnetfeld, das größer ist als beide Koerzitivfeldstärken und von einem einzustellen Nettomagnetfluß der Schichtsubsysteme abhängen kann, gesättigt. Bei abnehmendem Magnetfeld richtet sich nun die Magnetisierung des magnetisch weichen Materials wegen der antiferromagnetischen Austauschkopplung antiparallel zur Magnetisierung des magnetisch härteren Materials aus.

Eine zweite Möglichkeit ist das Einprägen einer Vorzugsachse in die Biasschicht und ein anschließendes Magnetisieren der Biasschicht entlang dieser Vorzugsachse. Eine solche uniaxiale Anisotropie kann spannungsinduziert oder feldinduziert sein oder auch als Kristallanisotropie vorgegeben werden. Vorzugsweise wird eine

feldinduzierte Vorzugsachse durch ein Biasmagnetfeld während der Ablagerung der Schichten in einem Vakuumsystem eingeprägt. Die Magnetisierung der antiferromagnetisch angekoppelten Magnetschicht stellt sich dann von selbst antiparallel zur Magnetisierung der Biasschicht ein. Es kann allerdings auch umgekehrt die Magnetschicht mit einer Vorzugsachse versehen werden und entlang dieser Vorzugsachse magnetisiert werden.

Eine dritte Möglichkeit zur Herstellung bietet die Wahl zweier magnetischer Materialien mit unterschiedlicher Curietemperatur und wenigstens annähernd gleicher Magnetisierung bei Raumtemperatur bzw. allgemein der Einsatztemperatur des Schalters für die Biasschicht und die Magnetschicht. Die Biasschicht und die Magnetschicht werden zusammen mit der dazwischen angeordneten Kopplungsschicht auf eine Einprägetemperatur gebracht, bei der sich die Magnetisierbarkeiten der beiden Materialien unterscheiden, und in einem temperaturabhängigen Biasmagnetfeld gesättigt, das wenigstens bei der Einprägetemperatur einen von Null verschiedenen Wert hat und beispielsweise kontinuierlich oder sprunghaft von der Temperatur abhängen kann. Liegt die Einprägetemperatur oberhalb der Einsatztemperatur, so wird die Schicht mit der höheren Curietemperatur stärker magnetisiert. Bei einer tiefer als die Einsatztemperatur liegenden Einprägetemperatur wird im allgemeinen die Schicht mit der niedrigeren Curietemperatur stärker magnetisiert. Bei einer darauffolgenden Temperaturänderung auf die Einsatztemperatur wird sich die Magnetisierung der stärker magnetisierten Schicht nicht mehr ändern und die Magnetisierung der anderen Schicht wird durch die antiferromagnetische Kopplung antiparallel ausgerichtet. Im allgemeinen wird die Einprägetemperatur höher gewählt als die Einsatztemperatur.

Die drei genannten Möglichkeiten der Wahl der Materialeigenschaften für das Schichtsubsystem können natürlich auch kombiniert werden.

Zwischen den beiden Schalterkontakten 11A und 11B bildet sich in dem gesamten Schichtpaket ein elektrischer Strom von Leitungselektronen aus. Dieser Strom läßt sich aus zwei nichtwechselwirkenden Teilströmen superponieren, die sich aus Elektronen unterschiedlichen Spins zusammensetzen. In den magnetisierten Schichten gibt es nun einen Teilstrom von Majoritätselektronen, deren Spins im Mittel parallel zur Magnetisierung der entsprechenden Schicht gerichtet sind, und einen Teilstrom von Minoritätsträgern mit im Mittel antiparallel zu dieser Magnetisierung gerichteten Spins. In magnetischen Übergangsmetallen, die vorzugsweise als Materialien für diese Schichten vorgesehen sind, sind die Streuquerschnitte der aus Fremdatomen gebildeten Streuzentren für Elektronen mit unterschiedlichem Spin unterschiedlich groß. Solche Streuzentren befinden sich sowohl innerhalb der magnetischen Schichten als auch an ihren Grenzflächen. Die Streuung der Elektronen in den nicht-magnetischen Zwischenschichten und den Kopplungsschichten ist dagegen spinunabhängig. Somit weisen sowohl die magnetischen Schichten als auch die Grenzflächen zu diesen Schichten für Majoritätselektronen und Minoritätselektronen unterschiedliche spezifische Widerstände R_{HOMAJ} bzw. R_{HOMIN} auf. Das Verhältnis $ALPHAR_{HOMIN}/R_{HOMAJ}$ des Widerstandes R_{HOMIN} für die Minoritätsträger zum Widerstand R_{HOMAJ} für die Majoritätsträger ist abhängig vom Wirtsmaterial und den Defekten.

In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform

werden die Materialien für die Schichten der Schaltvorrichtung derart gewählt, daß der spezifische Widerstand für denjenigen Elektronentyp, der in der Schaltschicht 2 bei entweder parallel oder antiparallel zueinander gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_S und \bar{M}_B in Schaltschicht 2 und Biasschicht 6 nur wenig gestreut wird, auch in den anderen Schichten, insbesondere der Magnetschicht 10, und an ihren Grenzflächen möglichst gering ist. Bei einer solchen Wahl erreicht man einen sehr guten Kontrast zwischen dem maximalen und dem minimalen Giant-Magnetowiderstandswert.

Als entscheidende Parameter werden dabei die Verhältnisse ALPHA von spezifischem Widerstand RHO_{MIN} für die Minoritätsträger und spezifischen Widerstand $RHOMAJ$ für die Majoritätsträger in den einzelnen Schichten und an ihren Grenzflächen eingestellt. Diese Parameter ALPHA werden durch die jeweiligen Wirtsmaterialien und Fremdatome als Streuzentren bestimmt. Die parallele bzw. antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen \bar{M}_S und \bar{M}_B kann dabei schon ohne Schaltmagnetfeld \bar{H}_S oder erst bei einem parallel bzw. antiparallel zu \bar{M}_B anliegenden Schaltmagnetfeld \bar{H}_S vorliegen.

In der dargestellten Ausführungsform werden die Parameter ALPHA für die Schaltschicht 2, ihre Grenzfläche zur Zwischenschicht 4, für die Biasschicht 6 und ihre beiden Grenzflächen zur Zwischenschicht 4 bzw. zur Kopplungsschicht 8 und für die weitere Biasschicht 6' und ihre Grenzfläche zur Kopplungsschicht 8' entweder alle größer oder alle kleiner als eins eingestellt. In der Magnetschicht 10 ist nun die Magnetisierung \bar{M}_I antiparallel zu den Magnetisierungen \bar{M}_S , \bar{M}_B und \bar{M}_B' der anderen magnetisierten Schichten gerichtet. Elektronen, die in der Schaltschicht 2 und den Biasschichten 6 und 6' Majoritätsträger sind, werden in der Magnetschicht 10 daher zu Minoritätsträgern und umgekehrt. Deshalb werden die Parameter ALPHA für die Elektronen in einem Spinzustand (Spinkanal) für die Magnetschicht 10 und ihre beiden Grenzflächen zu den Kopplungsschichten 8 und 8' größer als eins gewählt, wenn die ALPHAs für diesen Spinkanal der anderen magnetisierten Schichten und ihrer Grenzflächen kleiner als eins sind, und kleiner als eins, wenn die anderen ALPHAs größer eins sind.

Vorzugsweise werden die ALPHAs der Schaltschicht 2 und der Biasschichten 6 und 6' sowie ihrer Grenzflächen größer als eins und der Magnetschicht 10 und ihrer Grenzflächen kleiner eins gewählt. Dann trägt zum Strom zwischen den Schalterkontakten 11A und 11B hauptsächlich nur der Teilstrom der Majoritätsträger bei, wenn die Magnetisierung \bar{M}_S parallel zu \bar{M}_B ist. Wird nun beispielsweise durch ein äußeres Biasfeld \bar{H}_B oder eine antiferromagnetische Austauschkopplung die Magnetisierung \bar{M}_S der Schaltschicht 2 in eine zur Magnetisierung \bar{M}_B der Biasschicht 6 antiparallele Lage gedreht, so werden die Majoritätselektronen in der Schaltschicht 2 zu Minoritätselektronen in den Biasschichten 6 und somit in dem gesamten Schichtsystem stark gestreut. Damit steigt der Giant-MR auf seinen maximalen Wert. Um die ALPHAs entsprechend einzustellen, können beispielsweise eine Nickel-Eisen(Ni-Fe)-Legierung für die Schaltschicht 2, eine Eisen-Kobalt(FeCo)-Verbindung für die Biasschicht 6, Rhodium (Rh) für die Zwischenschicht 4, Nickel (Ni) für die Magnetschicht 10 und Kupfer (Cu) für die Kopplungsschicht 8 verwendet werden.

Eine dritte prinzipielle Ausführungsform ad (iii) zum Verschieben der Grenzwerte H_1 und H_2 der Schaltkur-

ve beruht auf der Tatsache, daß die magnetische Austauschwechselwirkung zwischen benachbarten, durch eine Zwischenschicht voneinander getrennten Magnetschichten von der Dicke der Zwischenschicht abhängt. Unterhalb einer bestimmten Zwischenschichtdicke von typischerweise 0,5 nm ist eine starke ferromagnetische Austauschkopplung zu verzeichnen. Bei etwas größeren Zwischenschichtdicken geht diese mit positivem Vorzeichen versehene ferromagnetische Austauschkopplung in eine antiferromagnetische, d. h. negative, Austauschwechselwirkung über. Um etwa 1 nm liegt ein antiferromagnetisches Austauschkopplungsminimum. Ein zweites antiferromagnetisches Minimum der Austauschwechselwirkung ist bei typischerweise etwa 2 nm Zwischenschichtdicke festzustellen. Zwischen diesen beiden antiferromagnetischen Minima liegt im allgemeinen ein ferromagnetisches Austauschkopplungsmaximum ("Physical Review B", Vol. 44, Nr. 13, Seiten 7131 bis 7134).

Stellt man nun in einer Ausführungsform gemäß Fig. 9 die Dicke d_1 einer Zwischenschicht 4 zwischen der Schaltschicht 2 und der Biasschicht 6 so ein, daß eine bestimmte Austauschkopplung zwischen Schaltschicht 2 und Biasschicht 6 resultiert, so verschieben sich die Grenzwerte H_1 und H_2 , bei denen die Schaltschicht 2 "schaltet". Eine negative, d. h. antiferromagnetische, Austauschkopplung hat eine Verschiebung der Grenzwerte H_1 und H_2 nach rechts in Richtung dieses positiven Schaltmagnetfeldes \bar{H}_S und eine positive, d. h. ferromagnetische Austauschkopplung eine Verschiebung nach links in Richtung von $-\bar{H}_S$ zur Folge. Das Schaltmagnetfeld \bar{H}_S dreht nämlich im einen Fall gegen die Kopplungskräfte und im anderen Fall mit Unterstützung der Kopplungskräfte die Magnetisierung \bar{M}_S der Schaltschicht 2.

Die Dicke d_1 der Zwischenschicht 4 wird bevorzugt in ein Austauschkopplungsminimum oder -maximum gelegt, um Dickentoleranzen bei der Schichtherstellung besser zu begegnen. Dies schränkt die Wahl für die Verschiebung der Grenzwerte H_1 und H_2 zunächst auf diese diskreten Werte ein. Eine beliebige Verschiebung innerhalb des Schaltoperationsbereichs SOR erreicht man jedoch, indem man zusätzlich die Dicke d_2 der Schaltschicht 2 entsprechend anpaßt.

Die Schaltkennlinien gemäß der Fig. 2 bis 4 können mit Hilfe von zwei entsprechend weitergebildeten Schichtpaketen der bisher beschriebenen Ausführungsformen realisiert werden. Die in diesen Fig. 2 bis 4 dargestellten Schaltsignale S3 bis S5 und ihre nicht dargestellten logischen Komplementsignale können nämlich aus zwei Einzelschaltsignalen S1 und/oder S2 gemäß Fig. 1 mit entsprechend eingestellten Grenzwerten H_1 und H_2 zusammengesetzt werden. Dazu werden zwei Schichtpakete mit den entsprechenden Schaltkennlinien S1 bzw. S2 so angeordnet und miteinander kontaktiert, daß sich ein Gesamtschaltsignal aus ihren beiden Widerständen ergibt.

Die beiden Schichtpakete sind in einer Ausführungsform räumlich getrennt voneinander angeordnet, beispielsweise durch Aufbringen auf zwei separaten Substraten, und in Reihe oder parallel zusammengeschaltet. Die Grenzwerte H_1 und H_2 der Schaltflanke des ersten Schichtpakets einerseits und die Grenzwerte H_3 und H_4 der Schaltflanke des zweiten Schichtpakets werden in einer vorteilhaften Ausführungsform dadurch eingestellt, daß man die Schichtpakete mit kollinear gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B1} bzw. \bar{M}_{B2} ihrer Biasschichten versieht und jeweils in einem dem entsprechenden

Schichtpaket zugeordneten äußeren Stützfeld \bar{H}_{B1} bzw. \bar{H}_{B2} sowie in einem gemeinsamen Schaltmagnetfeld \bar{H}_S anordnet. Die Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} der Bias-schichten, die Stützfelder \bar{H}_{B1} und \bar{H}_{B2} und das Schaltmagnetfeld \bar{H}_S sind kollinear zueinander ausgerichtet. Eine Schaltkennlinie gemäß Fig. 2 erhält man nun, indem man die Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} der Bias-schichten der zwei verschiedenen Schichtpakete antiparallel zueinander und die äußeren Stützfelder \bar{H}_{B1} und \bar{H}_{B2} für die Schichtpakete parallel zu den Magnetisierungen \bar{M}_{B1} bzw. \bar{M}_{B2} ihrer jeweiligen Biasschichten ausrichtet. Eine Schaltkennlinie S4 gemäß Fig. 3 oder S5 gemäß Fig. 4 ergibt sich bei paralleler Ausrichtung der Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} und gleichzeitiger antiparalleler Ausrichtung der Stützfelder \bar{H}_{B1} und \bar{H}_{B2} . Für ein Schaltsignal S5 gemäß Fig. 4 sind die Stützfelder \bar{H}_{B1} und \bar{H}_{B2} dabei gerade so stark wie die Koerzitivfeldstärke der Schaltschicht.

Zum Verschieben der Schaltflanken sind auch die anderen Ausführungsformen für die einzelnen Schichtpakete mit internen Stützfeldern bzw. austauschgekoppelten Schichten möglich.

In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform ordnet man jedoch die beiden Schichtpakete in einem gemeinsamen Doppelschichtpaket an. In diesem Fall kann höchstens bei einem der beiden Schichtpakete die Verschiebung der durch die Grenzwerte H_1 und H_2 oder H_3 und H_4 bestimmten Schaltflanke mit Hilfe eines äußeren Biasfeldes \bar{H}_B eingestellt werden, weil sonst die beiden Biasfelder einander überlagern würden. Im folgenden werden einige Ausführungsbeispiele einer Vorrichtung mit einem solchen Doppelschicht-Paket beschrieben.

In zwei Ausführungsformen gemäß den Fig. 10 und 11 sind ein erstes Schichtpaket ML1 mit parallel zum positiven Schaltmagnetfeld \bar{H}_S gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B1} seiner Biasschichten 61 und ein zweites Schichtpaket ML2 mit antiparallel zum positiven Schaltmagnetfeld \bar{H}_S und damit parallel zum negativen Schaltmagnetfeld $-\bar{H}_S$ gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B2} seiner Biasschichten 62 aufeinander gestapelt. Das erste Schichtpaket ML1 hat damit eine Kennlinie, die im allgemeinen durch Translation aus dem Schaltsignal S2 gemäß Fig. 1 hervorgeht, und das zweite Schichtpaket ML2 hat eine entsprechend aus dem Schaltsignal S1 herleitbare Schaltkennlinie. Die Translation der Schaltflanke T2 bzw. T1 und ihrer zugeordneten Grenzwerte H_3 und H_4 bzw. H_1 und H_2 gemäß Fig. 2 wird durch Einstellen einer Austauschkopplung zwischen den Schaltschichten 21 bzw. 22 und den Biasschichten 61 bzw. 62 für jedes Schichtpaket ML1 bzw. ML2 erreicht. Das Vorzeichen der Austauschkopplung wird bei beiden Schichtpaketen ML1 und ML2 gleich eingestellt. Vorzugsweise stimmen auch die Werte ihrer Austauschkopplungskonstanten überein. Bei positiven Austauschkopplungskonstanten erhält man eine dem Schaltsignal S3 gemäß Fig. 2 entsprechende Kennlinie und bei negativen Kopplungskonstanten ein komplementäres oder invertiertes Schaltsignal NOT S3.

Um die umgekehrt zueinander gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} der Biasschichten 61 bzw. 62 der beiden Schichtpakete ML1 bzw. ML2 einzustellen, kann man die beiden Schichtpakete ML1 und ML2 auf getrennten Substraten herstellen, ihre Biasschichten 61 bzw. 62 getrennt magnetisieren und beide Schichtpakete ML1 und ML2 dann zusammenfügen. Die dargestellten besonders vorteilhaften Ausführungsformen gemäß den Fig. 10 und 11 beruhen dagegen auf dem Einsatz

entsprechend weitergebildeter Schichtsubsysteme aus antiferromagnetisch gekoppelten Schichten gemäß den Ausführungsformen der Fig. 5 und 6.

In der Ausführungsform gemäß Fig. 10 sind die Schichtpakete ML1 und ML2 jeweils zusammenhängend, und zwischen zwei Schaltschichten 21 oder 22 jedes Schichtpakets ML1 bzw. ML2 ist ein symmetrisches Schichtsubsystem aus einer Magnetschicht 101 bzw. 102 und zwei auf beiden Seiten an die Magnetschicht 101 bzw. 102 antiferromagnetisch gekoppelten Biasschichten 61 und 61' bzw. 62 und 62' angeordnet. Die Biasschichten 61 des ersten Schichtpakets ML1 sind magnetisch weicher als seine Magnetschichten 101. Die Biasschichten 62 des zweiten Schichtpakets ML2 sind dagegen aus einem magnetisch härteren Materials als die entsprechenden Magnetschichten 102. Beim Magnetisieren des aus beiden Schichtpaketen ML1 und ML2 zusammengesetzten Doppelschichtpakets im Rahmen seiner Herstellung werden die Magnetisierungen \bar{M}_{11} und \bar{M}_{B2} der jeweils magnetisch härteren Schichten 101 bzw. 62 in einem ausreichend großen Ausrichtfeld einheitlich ausgerichtet. Die Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{12} der magnetisch weicheren Schichten 61 bzw. 102 stellen sich dann aufgrund der antiferromagnetischen Austauschwechselwirkung von selbst antiparallel zu den Magnetisierungen \bar{M}_{11} bzw. \bar{M}_{B2} der magnetisch härteren Schichten 101 bzw. 62 ein. Wo die beiden Schichtpakete ML1 und ML2 zusammenstoßen, sind vorzugsweise eine magnetisch weichere Biasschicht 61 des ersten Schichtpakets ML1 und eine magnetisch härtere Biasschicht 62 des zweiten Schichtpakets ML2 direkt antiferromagnetisch aneinandergesekoppelt.

In der Ausführungsform gemäß Fig. 11 sind die beiden Schichtpakete ML1 und ML2 miteinander verschachtelt, indem einzelne Teile, die eine Schaltschicht 21 bzw. 22 und zwei die Schaltschicht 21 bzw. 22 umgebenden Biasschichten 61 bzw. 62 enthalten, in der Schichtfolge einander abwechseln. Die einander unmittelbar benachbarten Biasschichten 61 und 62 zweier benachbarter Teile verschiedener Schichtpakete ML1 bzw. ML2 sind antiferromagnetisch gekoppelt. Außerdem weisen die Biasschichten 61 und 62 der verschiedenen Schichtpakete ML1 bzw. ML2 unterschiedliche Koerzitivfeldstärken auf. Dadurch richten sich nach einem einheitlichen Ausrichten der Magnetisierungen \bar{M}_{B2} der magnetisch härteren Biasschichten 62 des zweiten Schichtpakets ML2 die Magnetisierungen \bar{M}_{B1} der magnetisch weicheren Biasschichten 61 des ersten Schichtpakets ML1 antiparallel zu den erstgenannten Magnetisierungen \bar{M}_{B2} aus. Es können natürlich auch wieder Schichtsubsysteme mit zusätzlichen Magnetschichten vorgesehen sein.

Sowohl in der Ausführungsform gemäß Fig. 10 mit zusammenhängenden als auch in der gemäß Fig. 11 mit verschachtelten Schichtpaketen werden die Dicken und Magnetisierungen der Biasschichten 61, 61', 62 und 62' und der weiteren Magnetschichten 101 und 102 vorzugsweise so eingestellt, daß die Summe ihrer Produkte zumindest annähernd Null ist. Das bedeutet, daß die antiferromagnetisch gekoppelten Schichtsubsysteme aus nur Biasschichten oder Biasschichten und weiteren Magnetschichten nach außen magnetisch weitgehend neutral sind und insbesondere keinen Magnetfluß in den Schaltschichten erzeugen. Schließlich können auch wieder Zwischenschichten zwischen Schalt- und Biasschichten und/oder Kopplungsschichten zwischen Bias- und Magnetschichten bzw. Biasschichten unterschiedlicher Schichtpakete vorgesehen sein.

Es können auch noch die Summen der Produkte aus Dicken und Magnetisierungen der Biasschichten und der Magnetschichten der Schichtsubsysteme in jedem Schichtpaket lokal unterschiedlich eingestellt werden, wobei vorzugsweise die Magnetflüsse der magnetisch härteren Schichten in bestimmten Bereichen des Gesamtpakets dominieren. Vorzugsweise wird für die Schicht mit dem größten Produkt das magnetisch härtere Material gewählt, um sie stabiler gegenüber entmagnetisierenden Feldern zu machen und die Einstellung ihrer Magnetisierung zu erleichtern.

Die Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} der Biasschichten 61 bzw. 62 der beiden Schichtpakete ML1 bzw. ML2 waren in den bisher beschriebenen Ausführungsformen mit Doppelschichtpaket antiparallel zueinander eingestellt. Nachfolgend werden einige Ausführungsformen mit parallel zueinander gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} aller Biasschichten 61 und 62 des gesamten Doppelschichtpakets vorgestellt. Beide Schichtpakete ML1 und ML2 haben somit entweder eine Kennlinie gemäß dem Schaltsignal S1 in Fig. 1, wenn die Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} entgegengesetzt zum positiven Schaltmagnetfeld \bar{H}_S gerichtet sind, oder eine Kennlinie gemäß dem Schaltsignal S2 in Fig. 1, wenn die Vektoren \bar{M}_{B1} , \bar{M}_{B2} und \bar{H}_S in die gleiche Richtung zeigen.

Um als Summensignal der beiden gleichartigen Schaltsignale ein Schaltsignal S4 gemäß Fig. 3 mit drei logischen Zuständen LL, LM und LH zu erhalten, muß man wieder die Schaltflanken T1 und T2 entsprechend verschieben können.

Die entsprechenden Grenzwerte H_1 und H_2 bzw. H_3 und H_4 werden in einer Ausführungsform auf der H_S -Achse translatiert, indem bei beiden Schichtpaketen zwischen den Schaltschichten und den zugeordneten Biasschichten durch die Wahl der Dicke und des Materials von dazwischen angeordneten Zwischenschichten eine magnetische Austauschkopplung eingestellt wird. Die Austauschkopplungskonstanten für die beiden Schichtpakete haben dabei verschiedene Vorzeichen.

In einer weiteren Ausführungsform werden nur die Schaltschichten und Biasschichten eines Schichtpakets austauschgekoppelt. Für das Doppelschichtpaket wird ein Stützfild \bar{H}_B vorgesehen, das eine zur Austauschkopplungskraft entgegengesetzte Richtung hat und betragsmäßig vorzugsweise nur halb so groß ist. In diesem Fall erhält man eine zum Ursprung symmetrische Schaltkennlinie. Das Stützfild \bar{H}_B kann extern oder auch intern in einem der Schichtpakete erzeugt werden.

Beide Schichtpakete können mit einer vorzugsweise periodischen Schichtfolge von Schichtsubsystemen in einer Ausführungsform gemäß Fig. 9 mit Bias-, Zwischen- und Schaltschicht ausgebildet sein. An die Biasschichten können jedoch auch wieder weitere Magnetschichten antiferromagnetisch angekoppelt sein, und mit solchen Schichtsubsystemen aus Schaltschicht, Zwischenschicht, Biasschicht und entweder Magnetschicht oder Magnetschicht und Biasschicht gemäß Fig. 5 bzw. 6 werden dann die Schichtpakete ausgebildet. Wenn kein internes Biasfeld erwünscht ist, werden die Dicken und Magnetisierungen der Bias- und Magnetschichten so eingestellt, daß sich ihr Magnetfluß nicht über den Schaltschichten schließt. Beide Schichtpakete können zusammenhängend sein und als Ganzes aufeinander angeordnet sein oder auch miteinander verschachtelt sein.

Eine Schaltkennlinie S5 gemäß Fig. 4 schließlich wird dadurch realisiert, daß man entweder in den gerade beschriebenen Ausführungsformen einer Vorrichtung mit

einer Schaltkennlinie gemäß Fig. 3 die Austauschkopplung zwischen Schaltschichten und Biasschichten gegen Null gehen läßt oder die Austauschkopplung durch ein internes oder externes Biasfeld \bar{H}_B kompensiert.

Eine besondere Ausführungsform einer Vorrichtung mit einem Doppelschichtpaket ist in Fig. 12 dargestellt. Es sind jeweils ein Schichtsubsystem eines ersten Schichtpakets ML1 und eines zweiten Schichtpakets ML2 veranschaulicht. Die dargestellten Schichtsubsysteme beider Schichtpakete ML1 und ML2 enthalten jeweils eine Schaltschicht 21 bzw. 22 und zwei auf beiden Seiten der Schaltschicht 21 bzw. 22 über jeweils eine Zwischenschicht 41 bzw. 42 austauschgekoppelte Biasschichten 61 bzw. 62 sowie an die beiden Biasschichten 61 bzw. 62 anschließende Kopplungsschichten 81 bzw. 82. An eine dieser Kopplungsschichten 81 bzw. 82 schließt jeweils eine weitere Magnetschicht 101 bzw. 102 an, die über die entsprechende Kopplungsschicht antiferromagnetisch an die entsprechende Biasschicht gekoppelt ist. Die Magnetisierungen \bar{M}_{B1} und \bar{M}_{B2} aller Biasschichten 61 bzw. 62 sind gleichgerichtet. Die Austauschkopplung zwischen der Schaltschicht 21 bzw. 22 und der Biasschicht 61 bzw. 62 hat bei den beiden Schichtpaketen ML1 bzw. ML2 ein unterschiedliches Vorzeichen.

Bei den bislang beschriebenen Ausführungsformen wurde von einem normalen Streuverhalten der Schaltschichten ausgegangen. Bei paralleler Ausrichtung der Magnetisierungen von Schaltschichten und Biasschichten war das Signal am kleinsten und bei antiparalleler Ausrichtung am größten. Dies muß jedoch nicht immer so sein, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Durch eine Abstimmung der Materialien für die einzelnen magnetischen Schichten der beiden Schichtpakete werden die vorstehend definierten Parameter ALPHA für die Schichten und ihre Grenzflächen eingestellt. In der Ausführungsform gemäß Fig. 12 sind in dem Schichtpaket ML1 die ALPHAs für die Schaltschicht 21 und die beiden Biasschichten 61 sowie für ihre Grenzflächen alle größer als 1 gewählt und die ALPHAs für die Magnetschicht 101 mit ihrer umgekehrt zu den Magnetisierungen \bar{M}_{B1} der Biasschichten 61 gerichteten Magnetisierung \bar{M}_{11} und die Grenzflächen der Magnetschicht 101 kleiner als 1 gewählt. In diesem Schichtpaket ML1 ist der Giant-MR daher wie gewohnt bei parallel zueinander gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B1} der Biasschichten 61 und \bar{M}_{S1} der Schaltschichten am kleinsten und die antiparallel gerichteten am größten. In dem zweiten Schichtpaket ML2 sind dagegen nur die ALPHAs der Biasschichten 62 und ihrer Grenzflächen größer als 1 und die ALPHAs der Schaltschicht 22 und der Magnetschicht 102 sowie ihrer jeweiligen Grenzflächen kleiner als 1 gewählt. In diesem Schichtpaket ML2 ist somit der Giant-MR bei parallel gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B2} und \bar{M}_{S2} der Biasschichten 62 und der Schaltschicht 22 am größten und bei antiparallel gerichteten am kleinsten. Die Parameter ALPHA können in beiden Schichtpaketen ML1 und ML2 auch umgekehrt gewählt werden, d. h. größer als 1 statt kleiner als 1 und gleichzeitig kleiner als 1 statt größer als 1.

Mit einem solchen Doppelschichtpaket kann ein Schaltsignal S3 gemäß Fig. 2 realisiert werden.

Stellt man nun die Vorzeichen der Austauschkopplungskonstanten in beiden Schichtpaketen ML1 und ML2 gleich ein bei zugleich entgegengesetzt gerichteten Magnetisierungen \bar{M}_{B1} bzw. \bar{M}_{B2} ihrer Biasschichten 61 bzw. 62, so resultiert bei gleicher Wahl der ALPHAs in den einzelnen Schichten wie in der gerade

beschriebenen Ausführungsform eine Schaltkennlinie wie das Schaltsignal S4 in Fig. 3. Sind die Austauschkopplungskonstanten Null, dann ergibt sich eine Schaltkennlinie gemäß dem Schaltsignal S5 in Fig. 4.

Die antiparallele Ausrichtung der Magnetisierungen \vec{M}_{B1} und \vec{M}_{B2} kann analog zu den bereits behandelten entsprechenden Ausführungsbeispielen erreicht werden.

Auch in allen anderen Ausführungsformen können die ALPHAs der Schaltschicht 2 und der Magnetschicht 10 beide entweder größer oder kleiner als 1 gewählt werden. Das ALPHA der Biasschicht 6 wird dann kleiner bzw. größer als 1 eingestellt. Dadurch kann das Schaltsignal des entsprechenden Schichtpakets mit abweichendem Streuverhalten invertiert werden. Es ergeben sich dann entsprechend abgeänderte Schaltsignale bei sonst gleichem Aufbau der Schichtpakete.

Als magnetische Materialien für die Schaltschichten können beispielsweise Co, Fe, Ni, SmCo oder auch TbFeCo und für die Biasschichten $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ oder auch $\text{Ni}_{66}(\text{CoFe})_{34}$ vorgesehen sein. Die Zwischenschichten bestehen aus einem Metall, vorzugsweise Cu, Au, Ag oder Cr, einem Halbleiter oder auch einem dielektrischen Material, beispielsweise SiO_2 oder SiN.

In den bisherigen Ausführungsbeispielen wurden nur Schaltkennlinien mit zwei oder drei logischen Zuständen und mit höchstens zwei Schaltflanken beschrieben. Selbstverständlich können aber auch Schaltsignale mit mehr als drei logischen Zuständen und/oder mehr als zwei Schaltflanken gemäß der Erfindung realisiert werden, indem eine entsprechende Anzahl von einzelnen Schichtpaketen vorgesehen wird. Diese Schichtpakete werden dann so gewählt, daß aus ihren Einzelschaltsignalen eine entsprechende Schaltkennlinie zusammengesetzt werden kann in Analogie zu den beschriebenen Schaltkennlinien und Vorrichtungen zu ihrer Realisierung. Beispielsweise können für eine Schaltkennlinie mit N Schaltflanken N Schichtpakete vorgesehen werden, wenn N eine natürliche Zahl ist.

Mögliche Anwendungen der Schaltvorrichtung gemäß der Erfindung sind in der digitalen Datenverarbeitung, der Magnetaufzeichnung oder auch Überwachungs- und Sicherungseinrichtungen zu sehen.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum magnetfeldgesteuerten Schalten mit folgenden Merkmalen:

- a) es ist eine Schaltmagnetfeldquelle (20) zum Erzeugen eines Schaltmagnetfeldes (\vec{H}_S) in einem vorgegebenen Schaltoperationsbereich (SOR) vorgesehen;
- b) es ist wenigstens ein Schichtpaket vorgesehen mit
 - b1) wenigstens einer Biasschicht (6) mit einer zum Schaltmagnetfeld (\vec{H}_S) kollinearen und von dessen Feldstärke (H_S) in dem Schaltoperationsbereich (SOR) zumindest weitgehend unabhängigen Magnetisierung (\vec{M}_B) und
 - b2) wenigstens einer Schaltschicht (2) mit einer Magnetisierung (\vec{M}_S), die zumindest mit einer Komponente in einem ersten Feldbereich unterhalb eines ersten Grenzwertes (H_1) parallel oder antiparallel und in einem zweiten Feldbereich oberhalb eines zweiten Grenzwertes (H_2) antiparallel bzw. parallel zur Magnetisierung (\vec{M}_B) der Biasschicht (6) gerichtet ist, wobei diese beiden Feldbereiche innerhalb des

Schaltoperationsbereiches (SOR) liegen;
c) es sind Schalterkontakte (11A und 11B) an dem Schichtpaket vorgesehen zum Erfassen eines Schaltsignals mit zwei logischen Zuständen (LL und LH), die durch ein Schaltmagnetfeld (\vec{H}_S) in dem ersten bzw. dem zweiten Feldbereich eingestellt sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß an die Biasschicht (6) auf der von der Schaltschicht (2) abgewandten Seite eine Magnetschicht (10) mit einer Magnetisierung (\vec{M}_1) magnetisch austauschgekoppelt ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Biasschicht (6) und die Magnetschicht (10) antiferromagnetisch gekoppelt sind.
4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Biasschicht (6) und der Magnetschicht (10) eine Kopplungsschicht (8) angeordnet ist.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß an die Magnetschicht (10) eine weitere Biasschicht (6') mit einer Magnetisierung ($\vec{M}_{B'}$) magnetisch austauschgekoppelt ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetschicht (10) und die weitere Biasschicht (6') antiferromagnetisch gekoppelt sind.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Magnetschicht (10) und der weiteren Biasschicht (6') eine Kopplungsschicht (8') angeordnet ist.
8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einstellen der beiden Grenzwerte (H_1 und H_2) die vektorielle Summe der Produkte aus den Dicken ($d_B, d_{B'}, d_1$) und den Magnetisierungen ($\vec{M}_B, \vec{M}_{B'}, \vec{M}_1$) in einem die Biasschicht (6) und die benachbarte Magnetschicht (10) bzw. die Magnetschicht (10) und die beiden benachbarten Biasschichten (6 und 6') enthaltenden Schichtsysteme ungleich Null gewählt ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß bei einem Schichtpaket mit mehreren Schichtsubsystemen die vektorielle Summe der Produkte aus den Dicken und den Magnetisierungen der magnetischen Schichten der Schichtsubsysteme zum oberen und/oder unteren Rand des Schichtpakets hin zunimmt.
10. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Schaltschicht (2) und der Biasschicht (6) eine Zwischenschicht (4) angeordnet ist.
11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltschicht (2) und die Biasschicht (6) über die Zwischenschicht (4) wenigstens annähernd magnetisch austauschgekoppelt sind.
12. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltschicht (2) und die Biasschicht (6) über die Zwischenschicht (4) magnetisch austauschgekoppelt sind.
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke (d_i) der Zwischenschicht (4) so gewählt ist, daß ein Austauschkopplungsmaximum für eine ferromagnetische Austauschkopplung oder ein Austauschkopplungsminimum für eine antiferromagnetische Austauschkopplung vorhanden ist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Zwischenschicht (4) aus einem Isolatormaterial gebildet ist.
15. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Grenzwerte (H_1 und H_2) durch die Wahl der Dicke (d_s) der Schaltschicht (2) eingestellt sind.
16. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein äußeres Stützfeld (H_B) zum Einstellen der Grenzwerte (H_1 und H_2) vorgesehen ist.
17. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Materialien für die Schichten derart gewählt sind, daß bei einer parallelen Ausrichtung der Magnetisierung (\bar{M}_S) der Schaltschicht (2) und der Magnetisierung (\bar{M}_B) der Biasschicht (6) der in der Schaltschicht (2) am wenigsten gestreute Elektronentyp mit dem einen Spinzustand auch in allen anderen magnetischen Schichten und an deren Grenzflächen weniger gestreut wird als der Elektronentyp mit dem anderen Spinzustand.
18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Materialien für die Schichten derart gewählt sind, daß bei einer antiparallelen Ausrichtung der Magnetisierung (\bar{M}_S) der Schaltschicht (2) und der Magnetisierung (\bar{M}_B) der Biasschicht (6) der in der Schaltschicht (2) am wenigsten gestreute Elektronentyp mit dem einen Spinzustand auch in allen anderen magnetischen Schichten und an deren Grenzflächen weniger gestreut wird als der Elektronentyp mit dem anderen Spinzustand.
19. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltschicht (2) wenigstens in Richtung kollinear zur Magnetisierung (\bar{M}_B) der Biasschicht (6) kürzer ausgebildet ist als die Biasschicht (6).
20. Vorrichtung nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke (d) der Schaltschicht (2) in Übergangsbereichen (24 und 25) zwischen Randbereichen (26 bzw. 27) des Schichtpakets ohne Schaltschicht (2) und einem inneren Bereich (23) mit Schaltschicht (2) kontinuierlich zunimmt.
21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Biasschicht (6) wenigstens in Richtung senkrecht zu ihrer Magnetisierung (\bar{M}_B) kürzer ausgebildet ist als die Schaltschicht (2).
22. Vorrichtung nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke der Biasschicht (6) in Übergangsbereichen zwischen Randbereichen des Schichtpakets ohne Biasschicht (6) und einem inneren Bereich mit Biasschicht (6) kontinuierlich zunimmt.
23. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Schalterkontakte (11A und 11B) vom seitlichen Rand des Schichtpakets beabstandet angeordnet sind.
24. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Schalterkontakte (11A und 11B) auf der obersten und/oder der untersten Schicht des Schichtsystems angeordnet sind.
25. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Schichtpaket mehrere Schaltschichten (2) und mehrere Biasschichten (6, 6') enthält, wobei die Magne-

tisierungen (\bar{M}_B , \bar{M}_B') der Biasschichten (6, 6') alle wenigstens annähernd gleichgerichtet sind.

26. Vorrichtung nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten in dem Schichtpaket derart angeordnet sind, daß sich eine periodische Schichtfolge ergibt.

27. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß jede Schaltschicht (2) eine magnetische Vorzugsachse aufweist.

28. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß jede Biasschicht (6, 6') eine magnetische Vorzugsachse aufweist.

29. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens zwei Schichtpakete (ML1 und ML2) vorgesehen sind.

30. Vorrichtung nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Schichtpakete (ML1 und ML2) zu einem Mehrfachschichtpaket zusammengefaßt sind.

31. Vorrichtung nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Schichtpakete (ML1 und ML2) derart miteinander verschachtelt sind, daß zwischen Teilschichtpaketen des ersten Schichtpakets (ML1) Teilschichtpakete des zweiten Schichtpakets (ML2) angeordnet sind.

32. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 29 bis 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetisierungen (\bar{M}_{B1}) aller Biasschichten (61) des ersten Schichtpakets (ML1) parallel zu den Magnetisierungen (\bar{M}_{B2}) aller Biasschichten (62) des zweiten Schichtpakets (ML2) gewählt sind.

33. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 29 bis 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetisierungen (\bar{M}_{B1}) aller Biasschichten (61) des ersten Schichtpakets (ML1) antiparallel zu den Magnetisierungen (\bar{M}_{B2}) aller Biasschichten (62) des zweiten Schichtpakets (ML2) gerichtet sind.

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

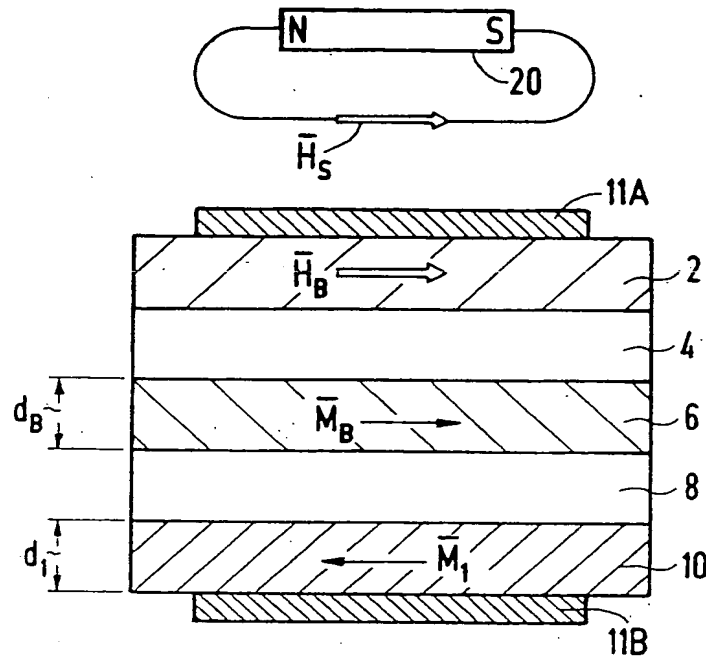


FIG 5

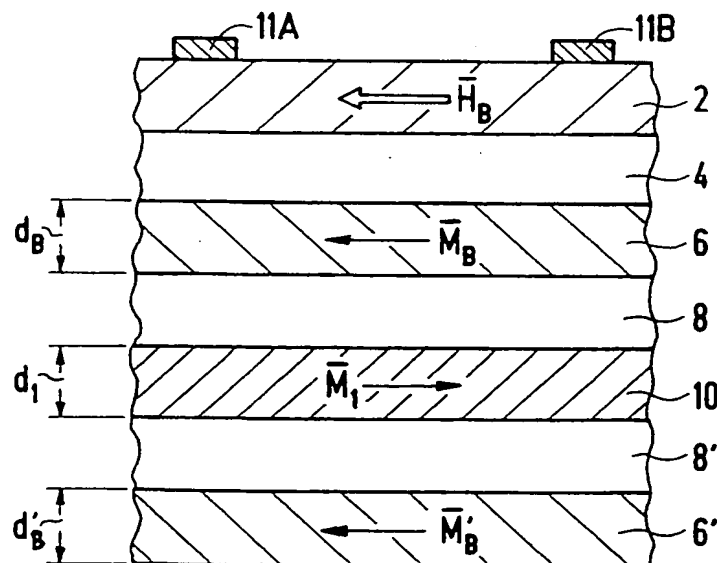


FIG 6

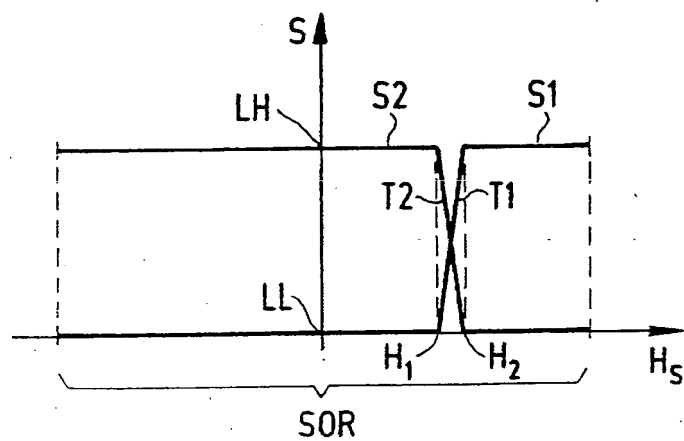


FIG 1

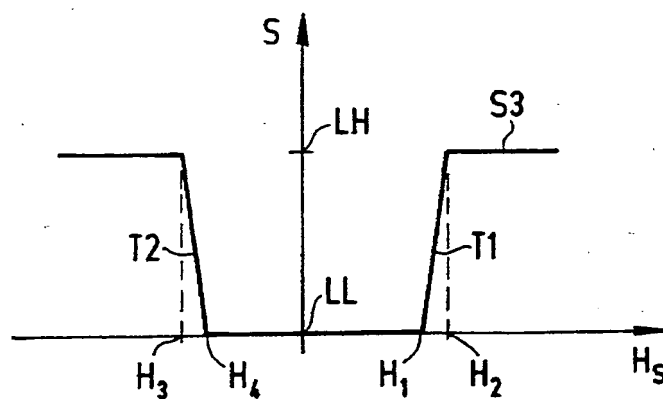


FIG 2

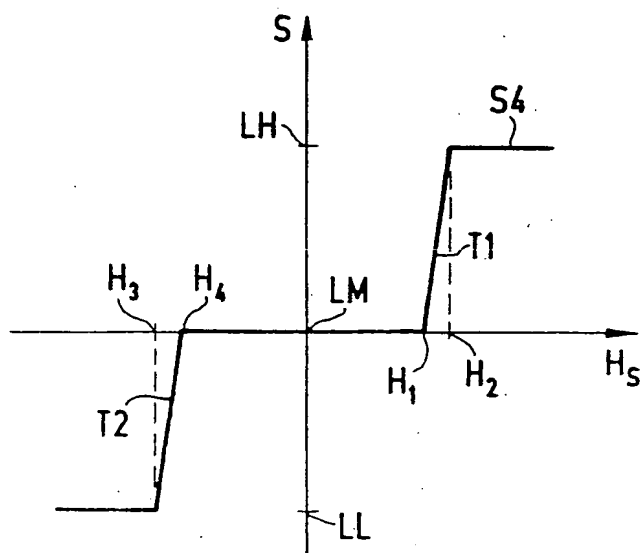


FIG 3

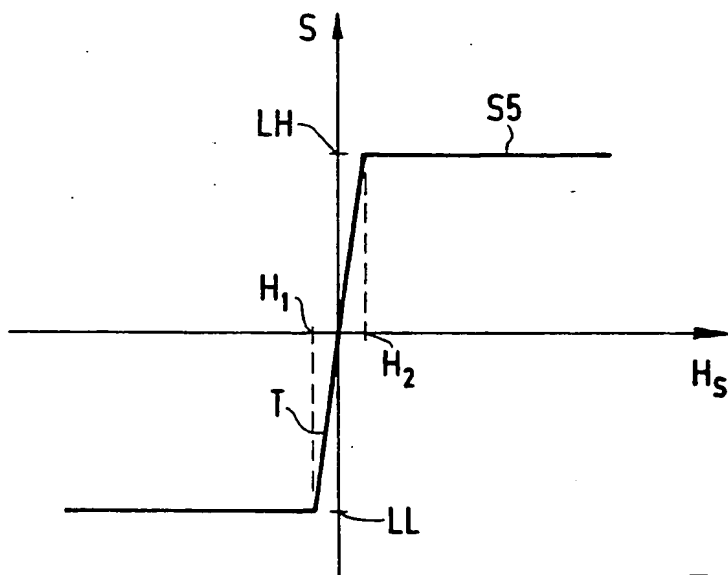


FIG 4

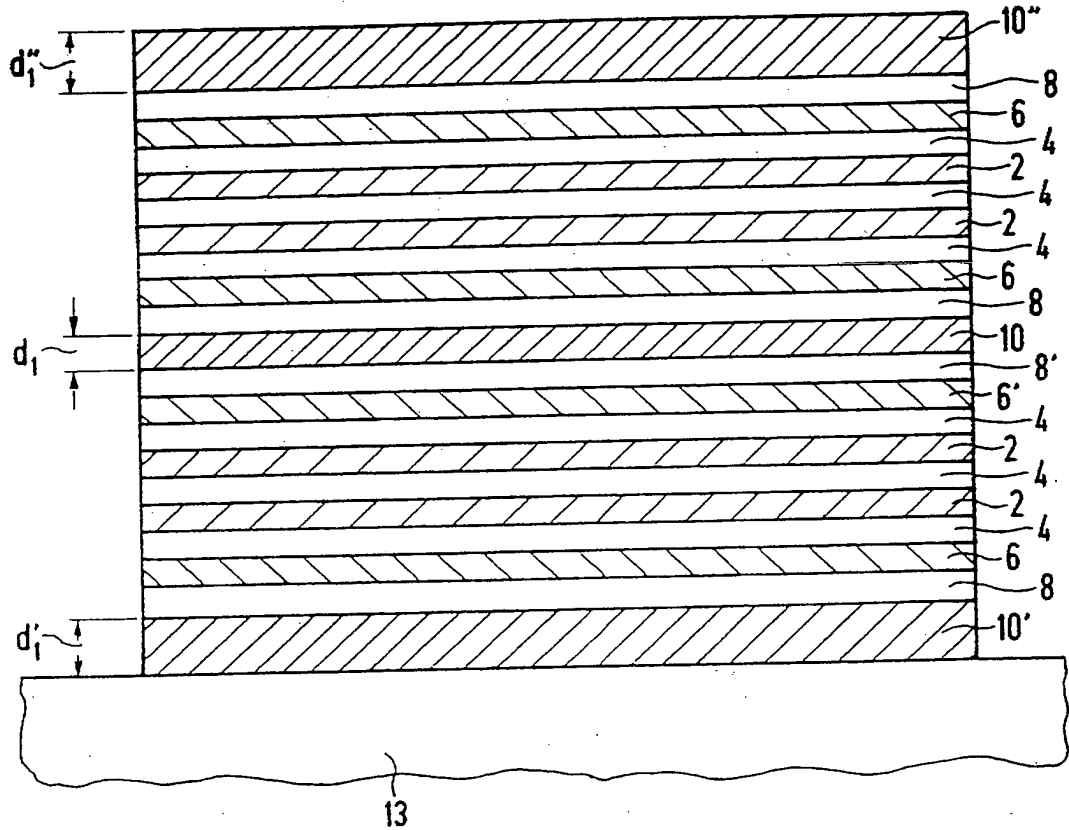


FIG 7

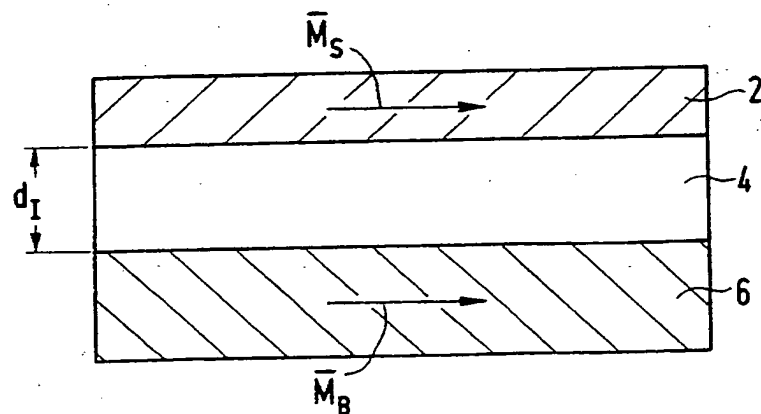
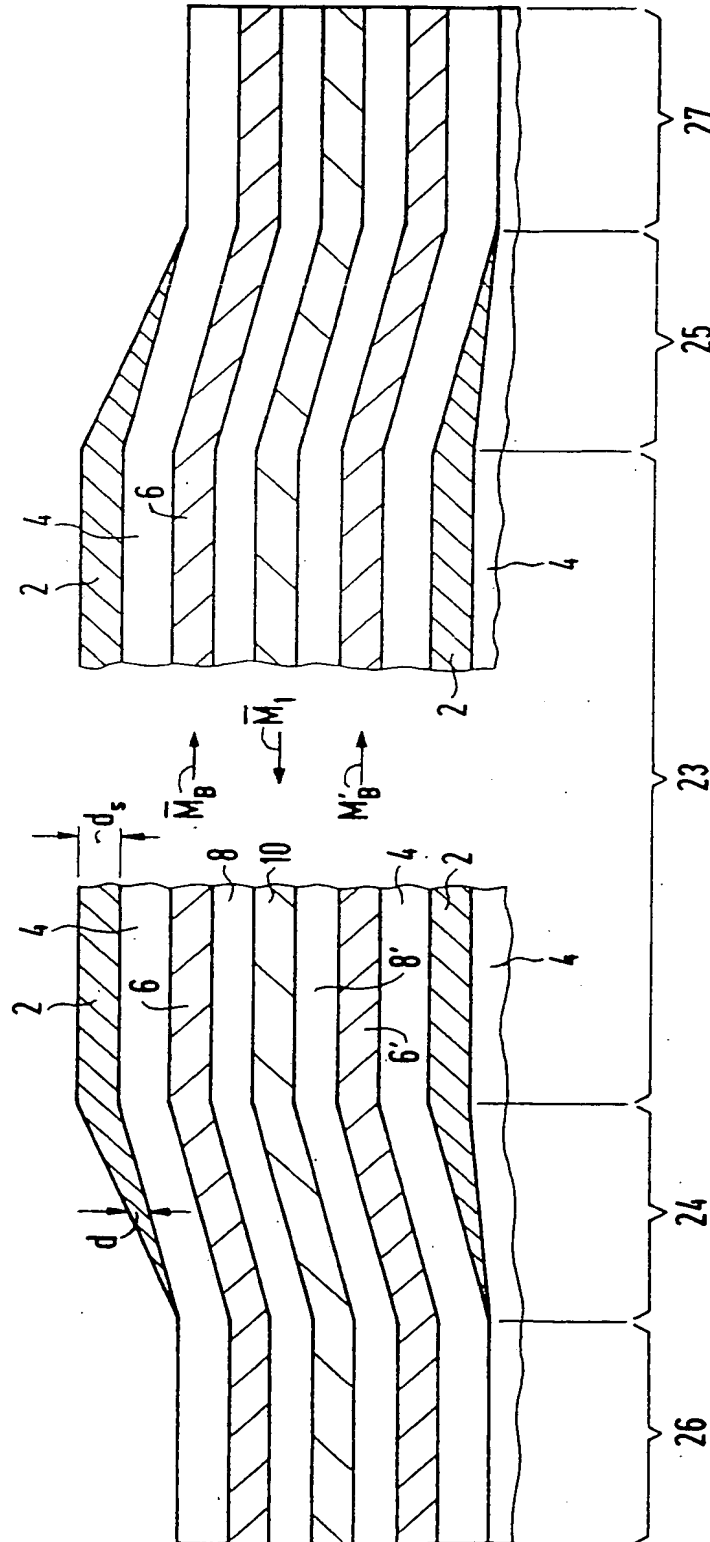
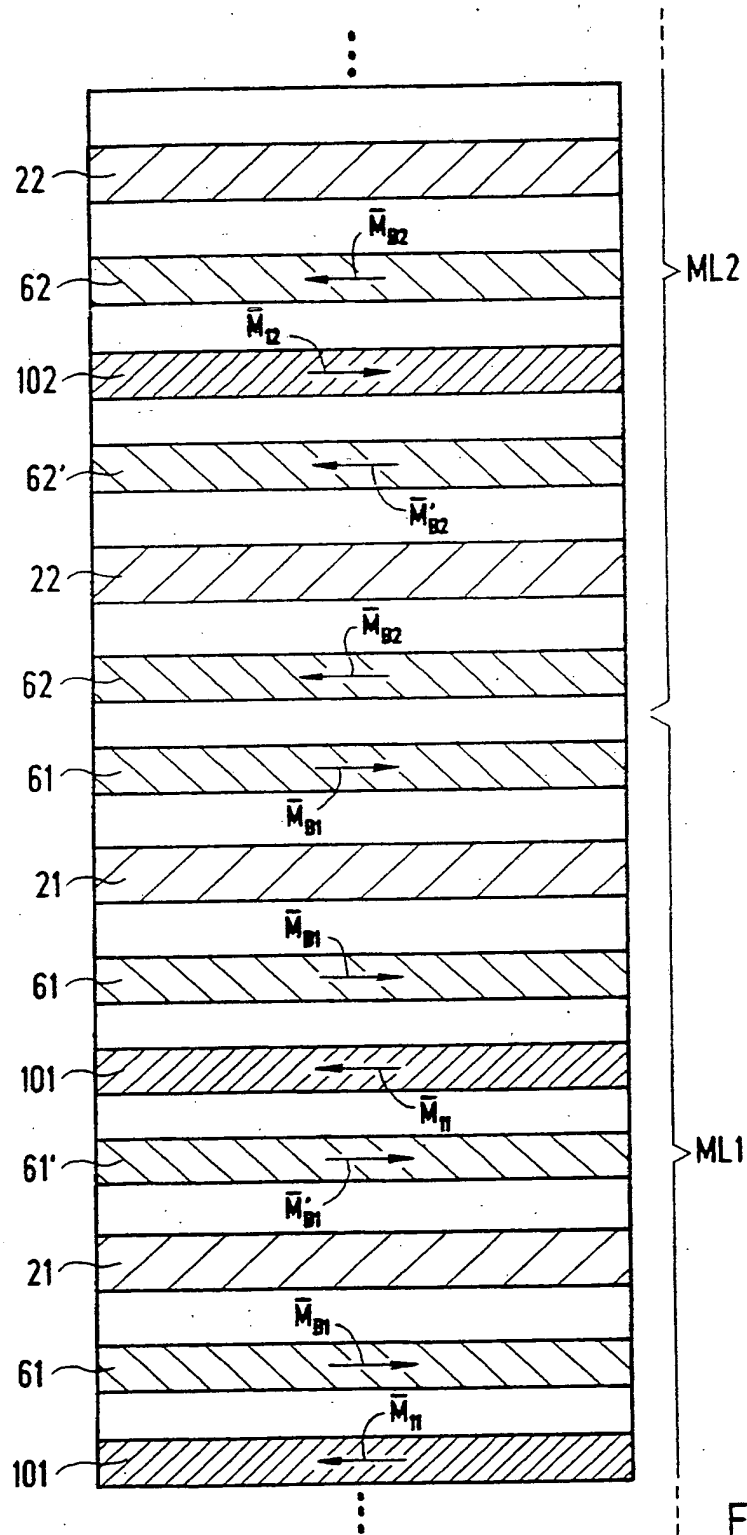


FIG 9





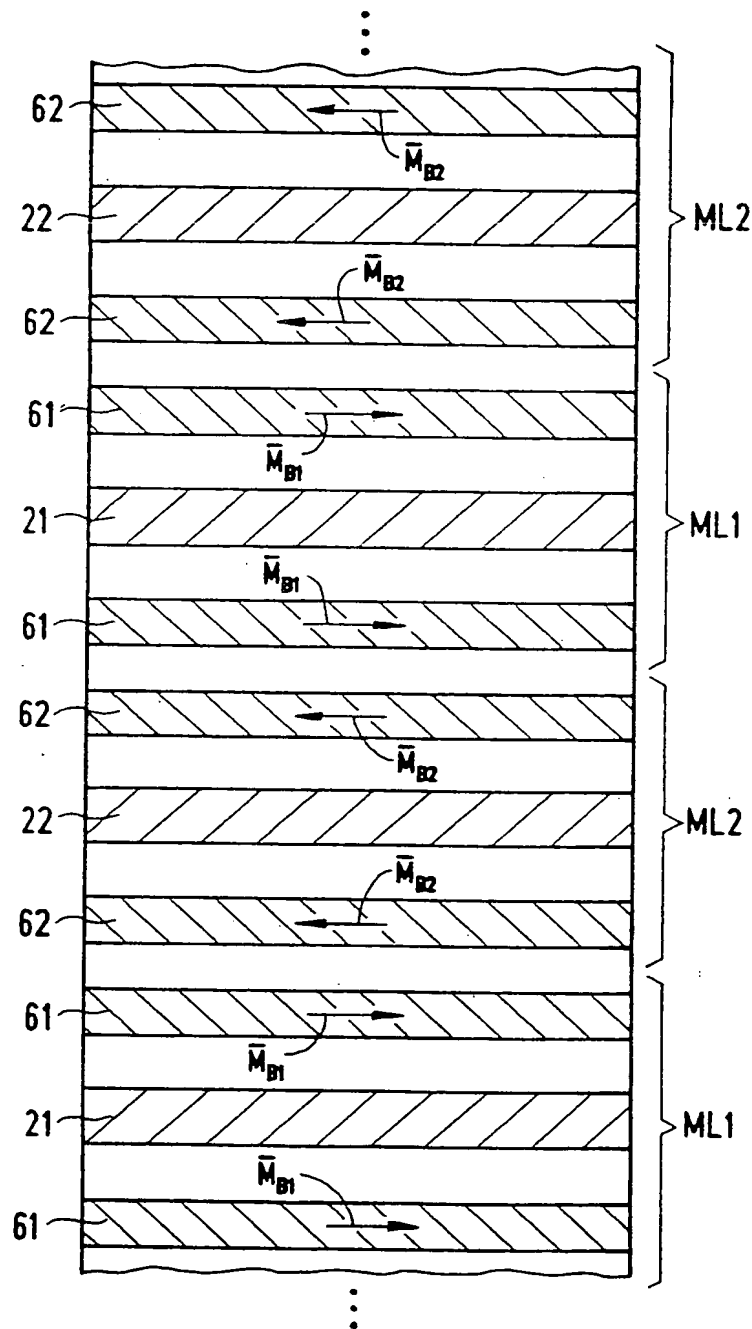


FIG 11

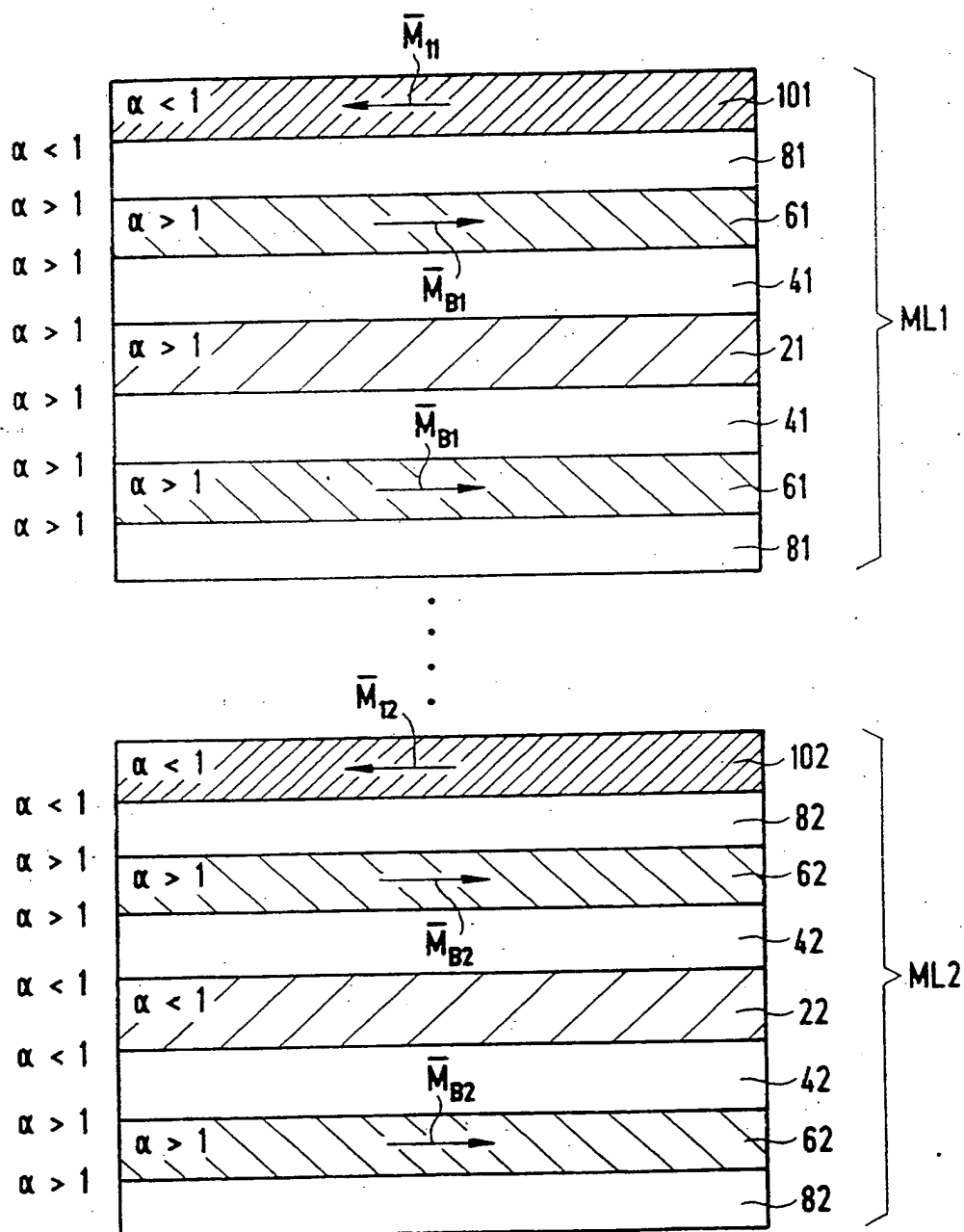


FIG 12

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)